

## ОТЗЫВ

научного руководителя Баженова Сергея Георгиевича на диссертационную работу Воронина Александра Юрьевича на тему «Разработка реконфигурируемых алгоритмов электродистанционной системы управления вертолёт», представленной к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки)

А.Ю. Воронин окончил Московский физико-технический институт (государственный университет) в 2008 г. по специальности «Прикладные математика и физика». В течение нескольких лет он занимается разработкой алгоритмов систем управления вертолёт и винтокрылых летательных аппаратов.

Повышение безопасности полётов является одной из приоритетных задач при разработке новых летательных аппаратов всех типов, в т.ч. вертолёт. При этом, как показывает анализ статистических данных, в последние десятилетия на фоне общего снижения аварийности вертолёт растёт относительное число авиационных происшествий, связанных с потерей управления. С другой стороны, по результатам исследований, выполненных как в нашей стране, так и за рубежом, существует непосредственная связь между вероятностью катастрофы из-за потери управления и уровнем характеристик устойчивости и управляемости летательного аппарата, что делает задачу улучшения этих характеристик ещё более актуальной. На вертолёт практически единственным средством для этого является повышение степени автоматизации управления, поэтому на новых и модернизируемых вертолёт всё чаще применяются цифровые электродистанционные системы управления (ЭДСУ). Функциональность алгоритмов ЭДСУ практически не ограничена, для них доступен полный ход органов управления. Кроме того, ЭДСУ имеют меньшую массу, более высокие эксплуатационные характеристики, а также обладают рядом других преимуществ перед необратимыми бустерными гидромеханическими системами управления, что уже продемонстрировано использованием ЭДСУ

на самолетах.

В качестве нормативных требований для вертолётов с ЭДСУ широкое международное признание получил стандарт *ADS-33*, использовавшийся при разработке практически всех существующих на данный момент серийных вертолётов с такой системой управления. В основе этого стандарта лежит понятие типа реакции — вида переходного процесса при отклонении рычагов управления вертолётom. Согласно *ADS-33*, в зависимости от режима полёта и других факторов вертолёт должен обладать определённым типом реакции, в рамках которого задаются количественные требования к пилотажным характеристикам. Поскольку удовлетворить конфликтующим требованиям к степени стабилизации и маневренным качествам вертолёта в рамках одного типа реакции, как правило, не удаётся, возникает необходимость реконфигурируемости алгоритмов управления, т.е. возможности автоматически или по желанию лётчика выбирать наиболее подходящий в конкретной ситуации тип реакции.

Целью диссертационной работы А.Ю. Воронина является разработка реконфигурируемых алгоритмов ЭДСУ, применимых на вертолётax различного класса и назначения, позволяющих выполнить современные требования к характеристикам устойчивости и управляемости вертолётов и повысить безопасность полёта. Для достижения этой цели автором проанализированы существующие требования к характеристикам устойчивости и управляемости вертолётов и определены те из них, которые оказывают определяющее влияние на выбор алгоритмов управления. Исходя из этих требований разработана структура реконфигурируемого алгоритма управления вертолётax с ЭДСУ и методика выбора его параметров, апробированная на конкретных примерах нескольких математических моделей вертолётов.

В разработанном автором реконфигурируемом многоконтурном алгоритме ЭДСУ для каналов тангажа, крена и рыскания каждый из контуров обеспечивает один из требуемых типов реакции. С помощью внутреннего

контура реализуется заданный тип реакции по угловой скорости (в каналах тангажа, крена и в канале рыскания при малых скоростях полёта) или координация разворота (в канале рыскания при больших скоростях полёта). При функционировании второго контура реализуется заданный тип реакции по углу тангажа, крена или рыскания, а при работе третьего — по линейной скорости перемещения в продольном и поперечном направлении. В этом алгоритме необходимая степень информационного обеспечения увеличивается сообразно степени автоматизации управления: во внутреннем контуре используются обратные связи только по угловой скорости и перегрузке, во втором к ним добавляются обратные связи по углам тангажа, крена и рыскания, в третьем — по линейным скоростям вертолётa. В этом заключатся одно из преимуществ разработанного автором реконфигурируемого алгоритма над алгоритмами, нашедшими применение на зарубежных вертолётaх, где даже для минимального уровня автоматизации всегда требуются резервированные сигналы обратных связей не только по угловым скоростям, но и по углам, что усложняет практическую реализацию и снижает надёжность ЭДСУ.

А.Ю. Ворониным теоретически обосновано использование во внутреннем контуре ЭДСУ интегрального алгоритма с эталонной моделью. В отличие от традиционного пропорционально-интегрального, такой подход позволяет практически полностью исключить негативное влияние интегральной части закона управления на характеристики управляемости в области средних частот, наиболее сильно проявляющееся у вертолётa с высоким собственным аэродинамическим демпфированием. Благодаря этому реконфигурируемый алгоритм становится универсальным, т.е. применимым для вертолётa с широким диапазоном полётных масс и собственных динамических характеристик.

В диссертационной работе А.Ю. Ворониным предложена методика оценки характеристик устойчивости и управляемости вертолётa с ЭДСУ с использованием эквивалентных моделей динамики, учитывающая, в отличие

от существующих методик, собственные динамические характеристики неавтоматизированного вертолѐта. В данной методике используются безразмерные переменные, что делает её удобной в т.ч. для параметрических исследований, оценки достижимого уровня пилотажных характеристик и определения требований к исполнительной части ЭДСУ на ранних этапах проектирования вертолѐта. С использованием этой методики автором определены области рациональных значений параметров реконфигурируемого алгоритма, зависящие от собственных динамических характеристик неавтоматизированного вертолѐта и обеспечивающие выполнение заданных требований к пилотажным характеристикам вертолѐта с ЭДСУ.

Количественные оценки характеристик устойчивости и управляемости, полученные с использованием эквивалентных моделей, А.Ю. Воронин подтвердил примерами синтеза алгоритмов ЭДСУ для тяжелого, среднего и лёгкого транспортных вертолѐтов, динамика которых описана полными моделями, в т.ч. линейной высокого порядка с учётом нескольких степеней свободы несущего винта и нелинейной. Отличие точных значений показателей устойчивости и управляемости от их оценок в большинстве случаев составило не более 10 %. Во всех рассмотренных случаях пилотажные характеристики вертолѐтов соответствуют Уровню 1 согласно принятым требованиям.

Дальнейшее развитие направлений исследований, которым посвящена диссертационная работа А.Ю. Воронина, представляется весьма актуальным и перспективным вследствие всё более широкого использования ЭДСУ на модернизируемых и перспективных вертолѐтах и винтокрылых летательных аппаратах.

Результаты, полученные А.Ю. Ворониным в ходе выполнения диссертационной работы, имеют большое практическое значение и представлены с достаточной полнотой. Диссертационная работа имеет хорошую апробацию. Материалы работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях и семинарах.

